



# LEVITAÇÃO QUÂNTICA: UM PROTÓTIPO DE APLICAÇÃO DO USO SUPERCONDUTORES DO TIPO 2 PARA O ENSINO DE ENGENHARIA

QUANTUM LOCKING: A PROTOTYPE APPLICATION OF SUPERCONDUCTORS TYPE 2 FOR ENGINEERING LEARNING

Thiago Kirazian Montechiari<sup>1</sup>, Marcio Magini<sup>2</sup>, Maira Regina Rodrigues<sup>3</sup>

DOI: 10.37702/REE2236-0158.v42p677-695.2023

**RESUMO:** O presente trabalho abordará o fenômeno de levitação quântica (*Quantum Locking*) encontrado nos materiais supercondutores de tipo 2 quando arrefecidos abaixo da sua temperatura crítica de supercondutividade e expostos a uma gama crítica de campo magnético, bem como uma aplicação prática para o ensino de engenharia. Essa aplicação foi o resultado de um estágio no Centro de Ciências de Luxemburgo e consiste na experiência de fazer um trem em miniatura levantar em torno de um trilho feito de ímãs permanentes, por meio da utilização de pastilhas supercondutoras de tipo 2 refrigeradas, durante mais de um minuto. Serão expostos os desafios práticos encontrados durante o desenvolvimento do projeto e os resultados alcançados.

**PALAVRAS-CHAVE:** levitação quântica; supercondutores tipo 2; aplicações.

**ABSTRACT:** This work will address the phenomenon of quantum locking found in type 2 superconducting materials cooled below their critical temperature of superconductivity and exposed to a critical range of magnetic field. We have demonstrated a practical application for engineering. This application was the result of internship at the Luxembourg Science Center and consists of the experience of making a miniature train levitate around a track made of permanent magnets. For this was used a refrigerated type 2 superconducting chips for more than one minute. Finally, the practical challenges encountered during the development of the project and the results achieved will also be exposed.

**KEYWORDS:** quantum locking, type 2 superconducting, applications.

<sup>1</sup> Engenheiro de Projetos, Luxembourg Science Center, thiagokm@me.com

<sup>2</sup> Prof. Dr. Associado, Instituto Politécnico, Programa de Ciências Matemáticas e Aplicações, Universidade Federal do Rio de Janeiro, mmagini@macae.ufrj.br

<sup>3</sup> Profa. Dra. Adjunta, Instituto Politécnico, Programa de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, maira.magini@macae.ufrj.br



## INTRODUÇÃO

O fenômeno da supercondutividade, em que a eletricidade flui sem resistência, foi descoberto pela primeira vez por Kamerlingh Onnes (1853-1926), físico e cientista holandês, da Universidade de Leiden. Onnes desafiou a liquefação do gás hélio (He) e conseguiu liquidificá-lo em 10 de julho de 1908. Como resultado da liquefação de He, foi registrado como o primeiro cientista a atingir a temperatura mais baixa (4,2 K / -269,1 °C) (ONNES, 1911). Depois disso, a sua equipe de investigação mediu a condutividade elétrica de metais puros a baixas temperaturas. Em 8 de abril de 1911, descobriu que a 4,2 K, a resistência em um fio sólido de mercúrio imerso em Hélio líquido (LHe), desapareceu subitamente (MEISSNER, 1933). Após a liquefação bem-sucedida do gás He, Onnes estudou a resistência elétrica do metal a baixa temperatura. A sua equipe de investigação escolheu o mercúrio (Hg) como tema de investigação, uma vez que o mercúrio é um líquido à temperatura ambiente. A resistência de Hg desapareceu a uma temperatura específica e ele descobriu o fenômeno supercondutor de resistência zero (MEISSNER, 1933; SHLYK et. al., 2005).

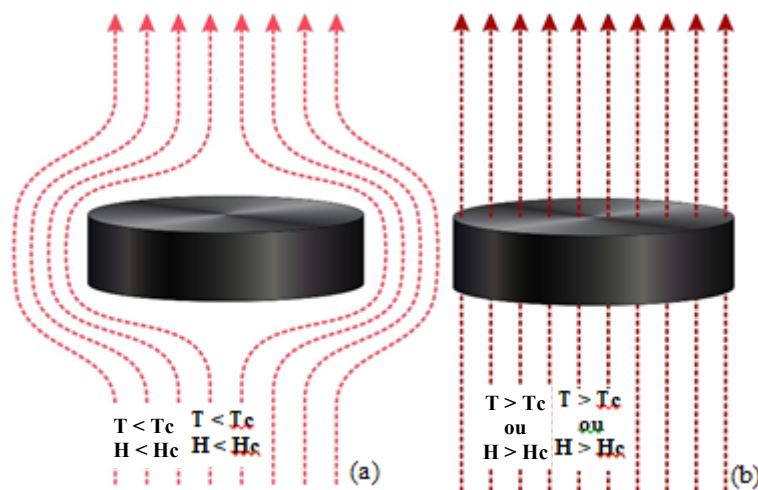
Onnes fez experiências para confirmar a perda elétrica nula do supercondutor. A equipe de investigação fez um circuito fechado supercondutor utilizando fios Pb (KIM et al., 1998). O circuito foi arrefecido utilizando-se LHe, e um campo magnético foi aplicado ao circuito a partir do exterior. Essa experiência foi levada adiante em 1914. Quando um campo magnético externo é aplicado ao condutor, uma corrente é induzida no condutor de acordo com a lei de Faraday (KIM et al., 2007). A bobina supercondutora poderia gerar um grande campo magnético de 10 Tesla (1 Tesla = 100.000 Gauss). Contudo, não foi capaz de produzir um grande campo magnético a partir da experiência de corrente persistente. Quando a corrente excedeu um valor crítico, foi gerada resistência nos fios supercondutores. Os supercondutores metálicos não conseguiram resistir aos pequenos campos magnéticos de várias centenas de G. Para utilizar o supercondutor para aplicações práticas, o supercondutor deveria resistir a um grande campo magnético de vários T e os supercondutores metálicos descobertos em estudos anteriores foram destruídos no pequeno campo magnético 600 G (REN et al., 1995). Mais tarde, foi entendido que o campo magnético interfere no fluxo da corrente supercondutora. Somente 40 anos após a descoberta da supercondutividade, o sonho foi parcialmente realizado por outros investigadores com a descoberta de

supercondutores de Tipo 2 que mostram elevadas capacidades de corrente em campos magnéticos elevados (TOMITA; MURAKAMI, 2003).

## Efeito Meissner e supercondutores do tipo 1 e 2

O físico alemão Fritz Walther Meissner (1882-1974) e Robert Ochsenfeld descobriram outro fenômeno supercondutor, o diamagnetismo perfeito (GRUSS et al., 2001). Esse fenômeno, em que o supercondutor expulsa o campo magnético, é chamado de “efeito Meissner”. Após a descoberta do supercondutor La-Ba-Cu-O por Bednorz e Müller, em 1986, muitos supercondutores de óxido com uma  $T_c$  superior à temperatura do azoto líquido (LN2) (77 K) foram descobertos (VASILIU et al., 1998). Os supercondutores são classificados em supercondutores de tipo 1 e tipo 2. **A Erro! Fonte de referência não encontrada.** 1 mostra linhas de fluxo magnético e m estado supercondutor e estado normal do supercondutor de tipo 1.

Figura 1 – Supercondutores sob um campo magnético H em diferentes temperaturas



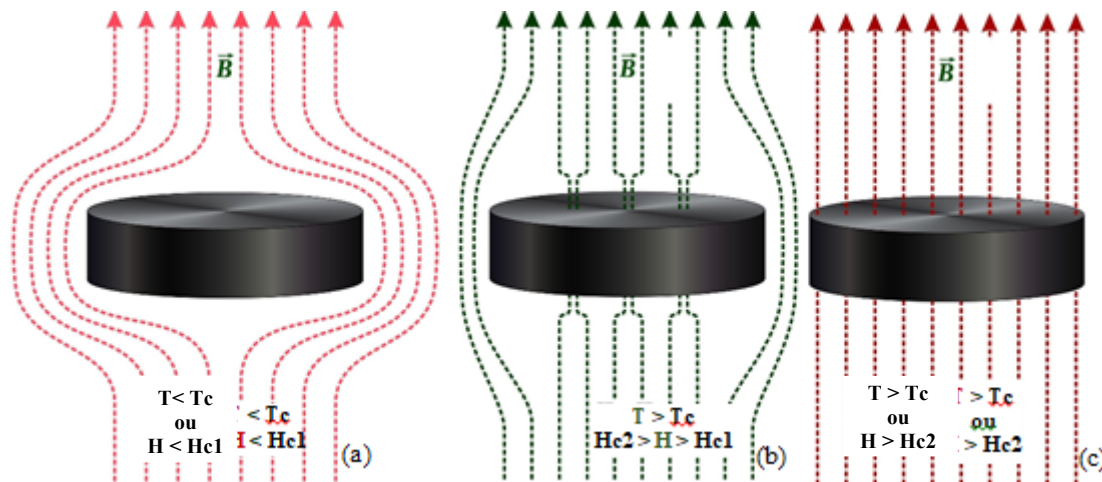
Fonte: Shutterstock, modificada pelos autores.

Nos supercondutores de tipo 1, o estado supercondutor é subitamente destruído quando o campo magnético externo excede o valor crítico ( $H_c$ ) ou a temperatura ( $T$ ) do supercondutor é superior a  $T_c$ . Se  $T < T_c$  e  $H < H_c$ , o campo magnético é empurrado para fora do supercondutor (Figura 1a), e se  $T > T_c$  ou  $H > H_c$ , o campo magnético passa através do supercondutor (Figura 1b).

Os supercondutores de tipo 2 são formados por ligas metálicas e outros compostos. Em geral, as temperaturas críticas ( $T_c$ ) associadas a eles são muito mais altas do que as associadas aos supercondutores do tipo 1, como é o caso das cerâmicas baseadas em óxidos de cobre (NOUGEM et al., 2004).

O  $H_c$  da maioria dos supercondutores de tipo 1 não era elevado, o que dificulta sua aplicação prática. Um novo material foi proposto para resolver essa questão, em 1935, por DIAS (2015), classificados como “supercondutor de tipo 2”.

**Figura 2 – Supercondutores de tipo 2 sob diferentes campos magnéticos  $H$  e temperaturas  $T$**



Fonte: Shutterstock, modificada pelos autores.

O supercondutor de tipo 2 tem dois campos magnéticos críticos:  $H_{c1}$  e  $H_{c2}$ . Quando  $H < H_{c1}$ , o campo magnético não pode entrar no supercondutor (um estado supercondutor, Figura 2a). Quando  $H_{c1} < H < H_{c2}$ , o campo magnético penetra no supercondutor, e o estado de supercondutor é destruído localmente em redor de um vórtice. O estado supercondutor e o estado normal coexistem (um estado misto). O vórtice é frequentemente capturado por defeitos presentes na matriz supercondutora (Figura 2b). Esse fenômeno é chamado de “pino de fluxo magnético”. Quando  $H > H_{c2}$ , o estado supercondutor é inteiramente destruído (um estado normal, Figura 2c).

Em 1957, um artigo intitulado “Sobre as propriedades magnéticas dos supercondutores do segundo grupo” foi publicado no JETP de Física Soviética (ZHOU; SCRUGGS; SALAMA, 2006). Depois disso, muitos materiais supercondutores de tipo 2 foram descobertos (KIM et al., 2012; YOKOYAMA et al., 2003; TOMITA; MURAKAMI, 2003; CHIBA et al., 2002).

## Teoria BCS

Herbert Fröhlich (1905-1991), um físico teórico, publicou um artigo descrevendo o estado em que os elétrons se podem atrair uns aos outros (COOMBS et al., 1998).



Nos anos 1950, verificou-se que a resistência era alterada quando os isótopos são adicionados ao supercondutor (HULL, 2000). A teoria BCS (Bardeen, Cooper e Schrieffer), responsável por explicar o fenômeno, foi apresentada em 2006 (MORITA; TESHIMA; HIRANO, 2006), seguida por vários outros estudos (KIM et al., 2012; BUNESCU, 1998; HÉBERT, SIMON, PROVOST, 1998; OKA et al., 2008).

## FUNDAMENTOS DA PROPOSTA EXPERIMENTAL

Construir uma aplicação sobre levitação quântica (*Quantum Locking*) através de um protótipo de um veículo (trem) desenvolvido junto ao Centro de Ciências de Luxemburgo (Luxembourg Science Center – LSC), usando a levitação a partir de um pequeno impulso inicial.

### Especificações da proposta

Os seguintes requisitos listados para a produção da aplicação: **design:** ser esteticamente bonito para atrair a atenção do público; ter um design futurista, visto que é uma tecnologia a ser aplicada no futuro; deve-se utilizar cores neutras. **Segurança:** ser totalmente segura aos que manuseiam o experimento e aos que assistem; desenvolver um manual de utilização para evitar o manuseio incorreto. **Experiência:** ser de fácil manuseio para os utilizadores; ser espetacular para quem assiste; ter o máximo de interação possível; ser contraintuitivo se possível. **Móvel:** o experimento deveria ser móvel para ser exposto em exposições de ciência e eventos específicos; não ultrapassar 200 quilogramas. **Estável:** a estrutura deveria ser sólida para evitar acidentes ocasionados por movimentos inesperados. **Manutenção:** o experimento deveria ser de fácil e rápida manutenção. **Dimensões:** o experimento não deveria ocupar mais do que 4m<sup>2</sup> e o trem deveria ser facilmente segurado com uma mão. **Tempo do experimento:** o experimento completo deveria ter que durar no máximo 10 minutos; o trem deveria levitar ao menos um minuto.

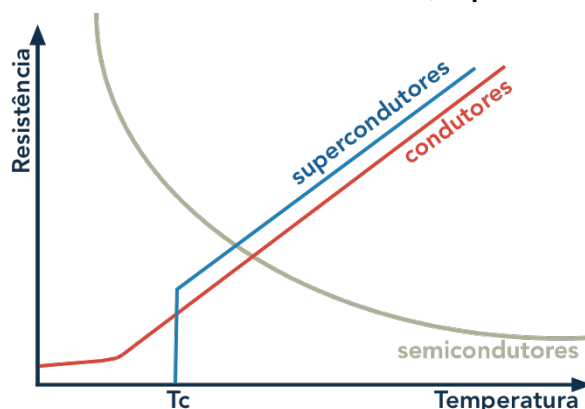
### Construção do protótipo

A levitação quântica, ou bloqueio quântico (*Quantum Locking*), consiste na levitação de um supercondutor de tipo 2 sob um campo magnético. Isso acontece quando esses tipos de supercondutores são arrefecidos a uma gama específica de temperaturas e sujeitos a uma gama específica de resistência do campo magnético. Para melhor explicar esse fenômeno, apresenta-se o Gráfico 1, que



mostra como a resistência elétrica dos condutores, semicondutores e supercondutores funciona a diferentes temperaturas.

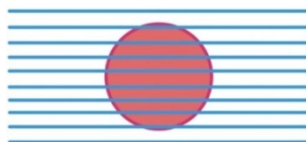
**Gráfico 1 – Gráfico da resistência elétrica em condutores, supercondutores e semicondutores**



Fonte: elaborado pelos autores.

Os supercondutores funcionam geralmente da mesma forma que os condutores, mas quando a sua temperatura atinge um ponto crítico, não têm resistência (não baixa resistência, mas zero resistência). Isso se deve a sua estrutura cristalina interna e as suas condições quânticas. Os condutores não ferromagnéticos simplesmente permitem que o campo magnético passe através da sua estrutura (Figura 3).

**Figura 31 – Linhas de campo magnético em um condutor não ferromagnético**

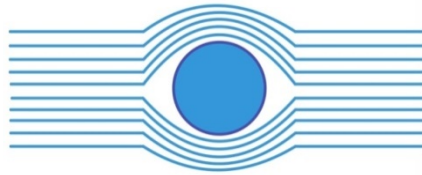


Fonte: elaborada pelos autores.

Os supercondutores acima da sua temperatura crítica e sujeitos a um campo magnético muito forte se comportariam da mesma forma. No entanto, se estiverem abaixo da sua temperatura crítica e sujeitos a um campo magnético crítico, não o deixarão passar, pelo que terá de contornar o supercondutor, efeito Meissner (Figura 4).



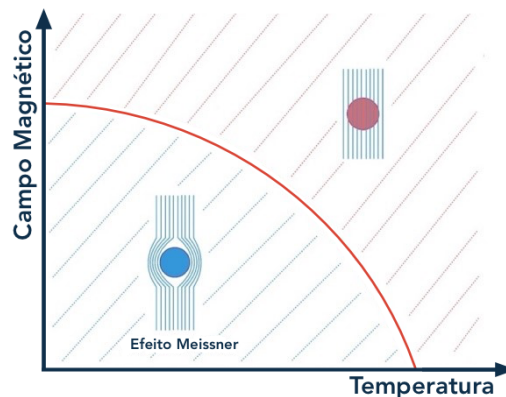
Figura 4 – Representação das linhas de campos magnético no Efeito Meissner



Fonte: elaborada pelos autores.

Os campos internos do supercondutor irão repelir o campo magnético externo, fazendo-o contornar o supercondutor (efeito Meissner). No entanto, se o campo magnético externo for suficientemente forte, os campos internos não serão capazes de repelir e este atravessará o material, como mostra o **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

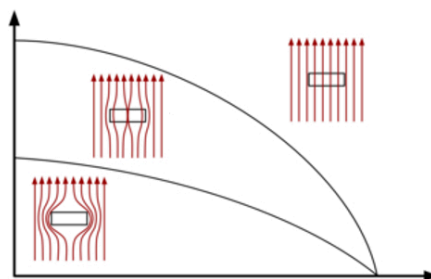
Gráfico 2 – Gráfico de comportamento dos supercondutores de tipo 1



Fonte: elaborado pelos autores.

O comportamento descrito pelo Gráfico 2, diz respeito aos supercondutores do tipo 1, diferente dos de tipo 2, descritos no **Erro! Fonte de referência não encontrada..** Neste exibem suas duas propriedades já conhecidas e também fazem o bloqueio quântico.

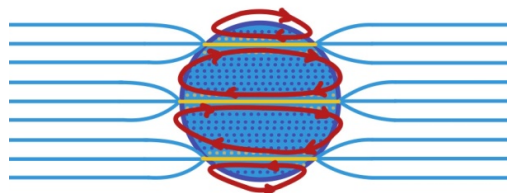
Gráfico 3 – Gráfico de comportamento dos supercondutores de tipo 2



Fonte: Wikipedia; modificado pelos autores.

Esse terceiro comportamento podemos obter quando os supercondutores estão na sua condição de resistência zero, mas o campo magnético externo não é suficientemente forte para passar por todo o supercondutor ( $H < H_{c2}$ ) e nem suficientemente fraco para ser repelido e contornado ( $H > H_{c1}$ ). Nesse momento, o campo magnético encontrará lugares específicos no supercondutor por onde pode “passar”, como na representação na Figura 5.

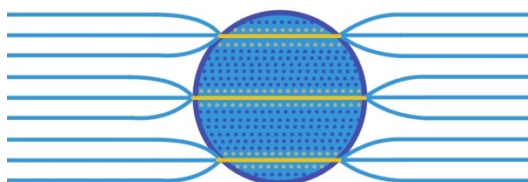
**Figura 5 – Representação de correntes persistentes**



Fonte: elaborada pelos autores.

Como mostra a Figura 5, as linhas do campo magnético se concentram em pontos específicos chamados vórtices, para passar pelo supercondutor de tipo 2. As correntes internas serão capazes de gerar os seus próprios pequenos campos magnéticos que irão repelir todas as outras linhas de campo, obrigando-os a passar pelos locais por onde o campo magnético já passou (vórtice). Após algum tempo, os pequenos campos magnéticos no interior do supercondutor e a sua própria estrutura cristalina se adaptarão ao campo magnético externo e eventualmente se equilibrarão entre eles (Figura 6).

**Figura 6 – Adaptação da estrutura cristalina às linhas de vórtice**



Fonte: elaborada pelos autores.

Para tal, o supercondutor deve ser forçado sob um campo magnético específico (entre  $H_{c1}$  e  $H_{c2}$ ) durante um determinado período (se já tiver sido arrefecido sob  $T_c$ ), ou deve ser mantido no seu lugar durante o seu processo de arrefecimento.





A escolha dos supercondutores deve levar em conta um meio simples de arrefecimento e os recursos de azoto líquido disponíveis. O azoto líquido está normalmente a  $-196^{\circ}\text{C}$ . As três principais escolhas seriam: a  $-135^{\circ}\text{C}$ : cristais de óxido de cobre com compostos de mercúrio; a  $-163^{\circ}\text{C}$ : cristais BSCCO (Bismuth strontium calcium copper oxide); e a  $-181^{\circ}\text{C}$ : cristais YBCO (estrutura especial formada por duas camadas finas de óxido de cobre alternadas com camadas intermediárias mais espessas com bário, cobre e oxigênio – Fórmula do Composto  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ ) (Figura 7).

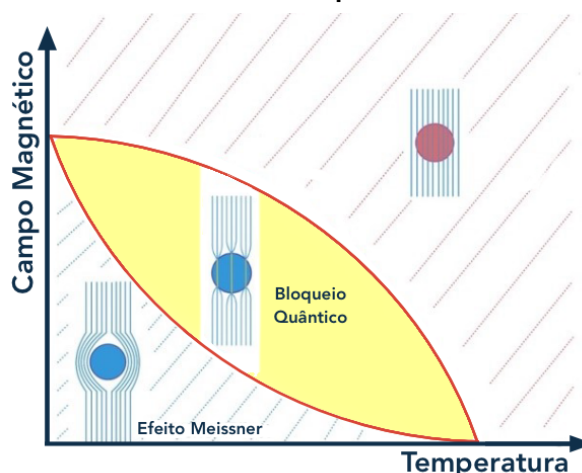
Figura 7 – YCBO



Fonte: 2dsemiconductors.com

A terceira opção foi escolhida. Os cristais YBCO (Figura 8) estão prontamente disponíveis no mercado, são materiais estáveis e custam menos de 3% dos cristais BSCCO. Com uma temperatura crítica para uma supercondutividade de  $-181^{\circ}\text{C}$ , isso deixaria uma margem de  $15^{\circ}\text{C}$  para se atingir a supercondutividade, ao utilizar o azoto líquido. O gráfico do YBCO (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**), gerado por medidas feitas pelo Departamento de Física da Universidade canadense British Columbia, mostra que, apesar de diferente do padrão de supercondutores de tipo 2, esse material permite que se alcance o bloqueio quântico mais facilmente.

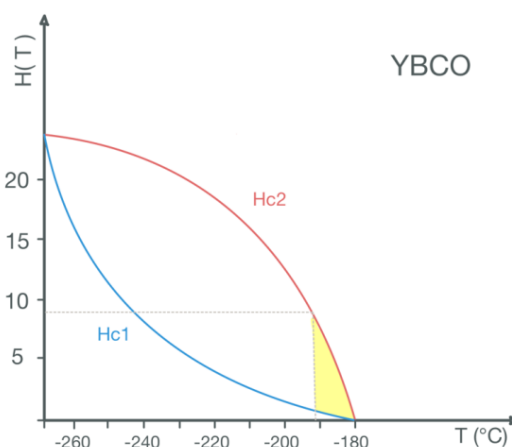
Gráfico 4 - Gráfico de comportamento do YBCO



Fonte: elaborado pelos autores.

O *quantum locking* é alcançado em toda região amarela e em campos magnéticos mais baixos. Pode-se obter a levitação em campos magnéticos próximo de 0,5 a 5T representados abaixo pela região amarela do **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

Gráfico 5 – Gráfico de comportamento do YBCO com zona atingível pelo resfriamento com azoto líquido representado em amarelo



Fonte: elaborado pelos autores.

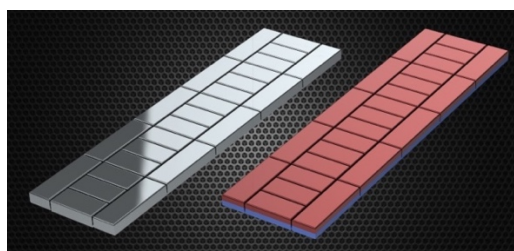
Os supercondutores YBCO não são amplamente comercializados e existem apenas algumas poucas empresas no mundo que os vendem em pequena escala. Estas normalmente os fabricam em forma cilíndrica com diferentes diâmetros e espessuras. Quanto maior o diâmetro, maior a estabilidade; no entanto a largura da miniatura não deveria ultrapassar os 5cm. Quanto à espessura, também se obtém mais estabilidade com almofadas mais espessas, mas deve se ter a certeza

de que todo o supercondutor está num fluxo magnético entre  $H_{c1}$  e  $H_{c2}$ . O campo magnético varia muito com a distância, isso deve ser considerado.

### Sistema de trilho magnético

O intuito era criar uma pista com uma linha central interna que tivesse o mesmo fluxo magnético ao longo de toda a pista, para isso a proposta foi combinar vários mini-ímãs lado a lado como mostrado na Figura 8, fruto da renderização do projeto básico.

**Figura 8 – Renderização da combinação de ímãs**



Fonte: elaborada pelos autores.

Na Figura 8, à esquerda, tem-se a combinação de ímãs, e à direita estão representados em vermelho os polos N e em azul os polos S dos ímãs. Existem quatro tipos principais de ímãs no mercado: NdFeB (Neodymium), Ferrite, SmCo e Alnico. O seu fluxo magnético depende da sua forma e tamanho; contudo, o Neodímio é o mais forte, e das suas variantes, a N52 possui o campo mais forte.

Os materiais YBCO atingem um bloqueio quântico entre 0,5 T e 9 T (Gráfico 5). A maioria dos mini-ímãs disponíveis comercialmente têm normalmente campos de 0,5 a 2 tesla. Neodímio N52 sobe para 8 tesla. Uma vez que o nosso  $H_{c1}$  é de aproximadamente 0,5 T e no protótipo proposto  $H_{c2}$  é de aproximadamente 10 T, o N52 seria a melhor solução. O comprimento estaria diretamente relacionado com o diâmetro do supercondutor. Quanto maior a espessura do ímã, mais forte o fluxo magnético; a melhor solução encontrada no mercado de mini-ímãs, nas dimensões que buscamos, foi a solução de 10 mm de espessura. Foram encomendados ímãs de n52 30mm x 10mm com espessura de 10mm e 5mm e feitas amostras de pistas (Figura 9).

**Figura 9 – Amostra da pista**



Fonte: elaborada pelos autores.

Foram realizadas medidas dos campos magnéticos obtidos ao centro da amostra de pista em diferentes alturas e os dados alcançados se encontram na Tabela 1.

**Tabela 1 – Intensidade dos campos magnéticos a cada distância**

Altura de medição	Amostra 10mm de espessura	Amostra 5mm de espessura
0mm	6,8 kg	8,1kg
4mm	5,3kg	6,1 kg
8mm	4,1 kg	4,6kg
12mm	3,1 kg	3,5 kg
16mm	2,2 kg	2,4 kg
20mm	1,1kg	1,2 kg

Fonte: elaborada pelos autores.

A diferença dos campos magnéticos acima de 10mm não foram discrepantes. Baseando-se nisso, e considerando a dificuldade da combinação de ímãs de 10mm de espessura, a opção foi os ímãs de 5mm. A pista seguiria um design futurista, seguindo uma superfície de Möbus. O resultado da pista é mostrado na Figura 10.

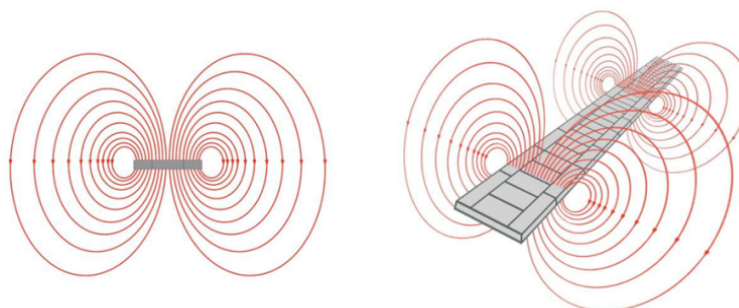
**Figura 10 – Pista finalizada**



Fonte: elaborada pelos autores.

O campo magnético obtido, em aproximação grosseira, é demonstrado na Figura 11. Ele é praticamente constante em toda a volta da pista.

**Figura 11 – Aproximação simples do campo magnético**

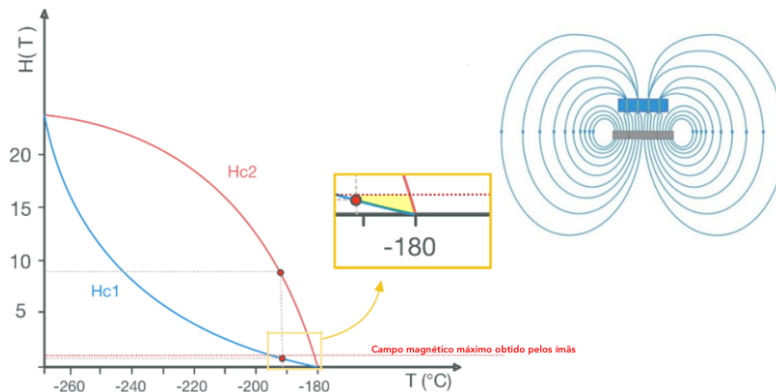


Fonte: elaborada pelos autores.

## TESTES E MEDIÇÕES

Existem três cenários possíveis durante os testes: 1) se o campo magnético não for suficientemente forte e a temperatura não for crítica, as pastilhas irão experimentar o efeito Meissner; 2) se a temperatura da pastilha não atingir a temperatura crítica para a supercondutividade, os supercondutores reagiriam como um condutor não ferromagnético; e 3) se a temperatura estiver abaixo do limiar crítico e o campo magnético for suficientemente forte, então o supercondutor será submetido a um bloqueio quântico, conforme o Gráfico 6.

Gráfico 6 – Região no gráfico para obter a levitação quântica, representada em amarelo



Fonte: elaborado pelos autores.

Nas primeiras experiências, supercondutores YBCO de diferentes tamanhos foram testados em diferentes alturas de levitação utilizando a amostra de pista anteriormente construída. Todas as pastilhas foram nomeadas, três tamanhos foram testados (35mm x 10mm; Ø35mm x 13mm e 35mm x 16mm) e os seus tempos de levitação antes da perda das suas propriedades supercondutoras foram notados (Tabela 2).

Tabela 2 – Tempos de levitação em diferentes alturas de 3 pastilhas de espessuras diferentes

Altura de levitação	Pastilha 1	Pastilha 2	Pastilha 3
3mm	29s	38s	45s
4mm	29s	38s	38s
5mm	19s	31s	25s
6mm	0s	20s	10s

Fonte: elaborada pelos autores.

Como esperado, a pastilha 2, de 35mm de diâmetro por 13mm de espessura, deu os melhores resultados. O segundo conjunto de experiências consistiu em medir o peso suportado pelas pastilhas colocadas à altura de 5mm, durante os seus primeiros 10 segundos. Foram obtidos os dados apresentados na Tabela 3:

Tabela 3 – Pesos e tempo de resistência de cada pastilha

Altura de levitação	Pastilha 1	Pastilha 2	Pastilha 3
200g	18s	30s	26s
400g	10s	28s	23s
600g	0s	24s	20s
800g	0s	0s	0s

Fonte: elaborada pelos autores.





Os protótipos foram criados com base nesses dados e eram preenchidos com azoto líquido e colocados em teste na pista, o momento de inércia do líquido no interior os repulsavam para fora da pista dependendo da velocidade. O protótipo oficial é mostrado na Figura 12.

**Figura 12 – Protótipo oficial 2**



Fonte: elaborada pelos autores.

Em seguida, também foram desenvolvidas duas mini versões a fim de se encontrar o tamanho mínimo ideal. Foram impressas em 3D, para serem submetidas a novos testes de tempo e peso suportado. Esses testes foram efetuados sobre a amostra da pista e foram obtidos os seguintes dados. O protótipo 2 tinha um tempo de bloqueio quântico inferior ao tempo do protótipo 1, e os menores ainda mais baixos. Isso mostra-nos que o tamanho do recipiente desempenha um papel realmente importante na experiência. O protótipo 2 também suportou 200gr. mais do que o protótipo 1, mas isso é compreensível uma vez que o protótipo 1 era mais pesado, o peso total (protótipo + peso suportado) no supercondutor era mais ou menos o mesmo. Partindo-se do princípio de sifão e de diminuição dos movimentos no interior, quanto menor os poros da esponja, melhor seriam os resultados. Em seguida, dez tipos de esponjas foram encomendados para testes. Esses testes consistiram em substituir a esponja do protótipo oficial 2 pela esponja em questão, colocá-lo na pista e medir quanto tempo até a falha. Os resultados estão expostos na Tabela 4:

**Tabela 4 – Resultados de diferentes esponjas no protótipo 2**

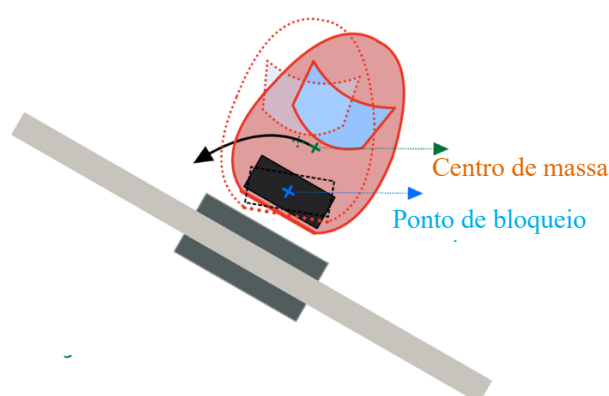
<b>Número da esponja</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Tempo até a falha</b>	175s	140s	0s	220s	192s	155s	305s	264s	0s	282s

Fonte: elaborada pelos autores.

Apesar de algumas esponjas nem sequer permitirem o bloqueio quântico, a esponja número 7 mostrou os melhores resultados. Com ela o protótipo 2 permaneceu em bloqueio quântico durante 6 minutos na pista, mesmo quando

em velocidades mais elevadas. O veículo de levitação final seguiu as seguintes especificações: o veículo deve ser reparável (substituição de supercondutores e esponjas); assemelhar-se a um trem moderno; o centro de gravidade deve estar no meio; e deve permanecer na pista durante pelo menos um minuto. Com base nessas especificações, foram produzidos três modelos. O modelo final devia atender o requisito de não realizar movimentos laterais demonstrados na Figura 13.

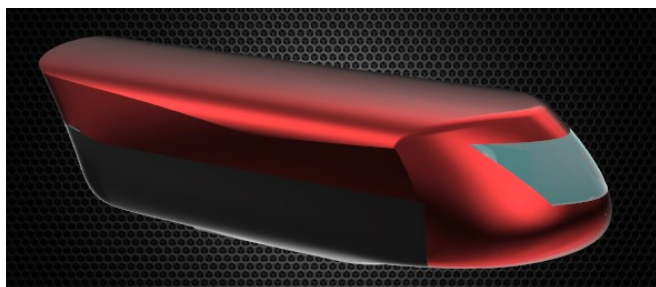
**Figura 13 – Representação do centro de gravidade**



Fonte: elaborada pelos autores.

O modelo final 3 foi alcançado guardando as mesmas dimensões da parte inferior e os mesmos mecanismos de encaixe, mas com centro de gravidade mais baixo, através da redução da altura da parte superior, como mostrado na Figura 14. Trata-se do modelo finalizado, que atingiu altas velocidades e levitação por 305 segundos.

**Figura 14 – Modelo final 3**

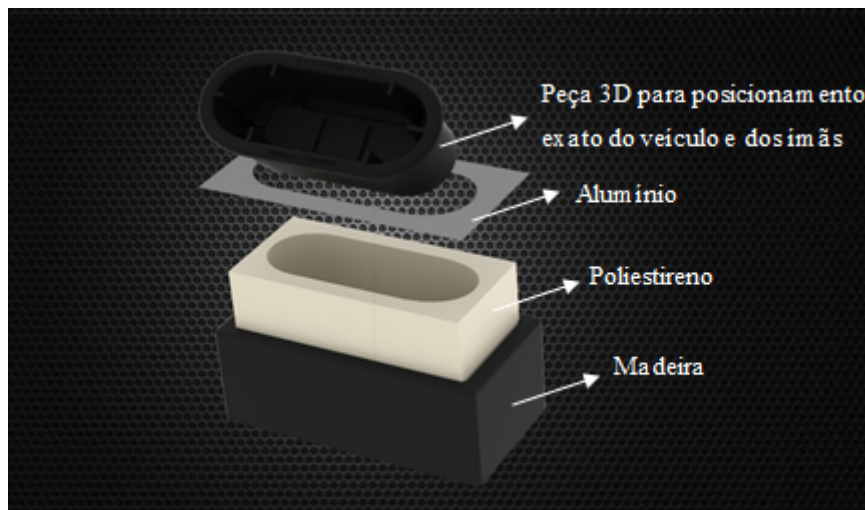


Fonte: elaborada pelos autores.

## Processo de arrefecimento

Visando criar um sistema simples para quem faz a demonstração foi criado um sistema descrito na Figura 15.

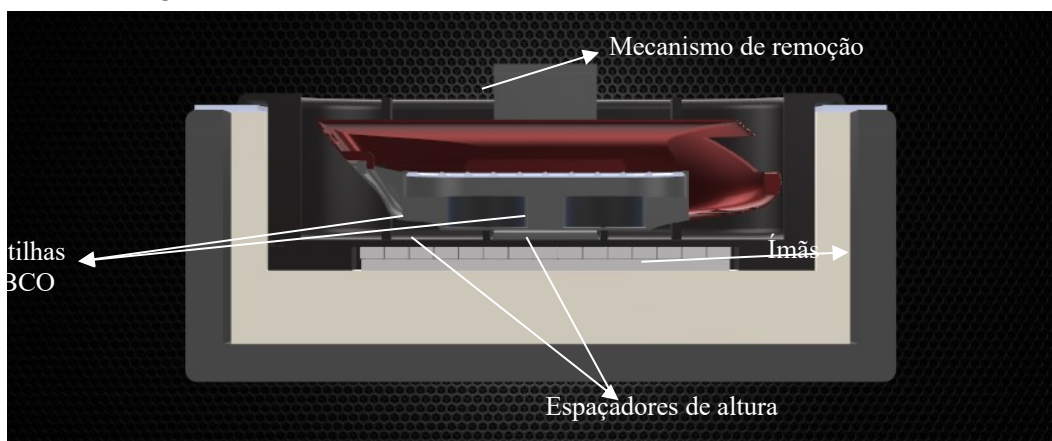
**Figura 15 – Renderização do recipiente de arrefecimento do sistema**



Fonte: elaborada pelos autores.

Essa plataforma era composta por um recipiente em poliestireno dentro de um recipiente em madeira, que receberiam ao seu interior uma peça de impressão 3D responsável por manter o trem e a amostra da pista na posição correta durante o resfriamento do veículo (Figura 16).

**Figura 16 – Vista de corte lateral do sistema de arrefecimento**



Fonte: elaborada pelos autores.



Finalmente, após todas as etapas anteriores, o projeto foi concluído, ultrapassando todos os objetivos. O veículo final percorreu a pista em levitação quântica durante mais de 6 minutos, o tempo de resfriamento ideal do trem é de 4 minutos, totalizando, assim, uma experiência de 10 minutos, conforme o desejado. O experimento está pronto desde setembro de 2021 e é utilizado pelos apresentadores do LSC para demonstrar a levitação quântica (<https://www.youtube.com/watch?v=WBh-LHpdzuQ>).

## CONCLUSÕES

O trabalho obteve ótimos resultados, serviu e ainda serve como objeto de demonstração para inúmeras apresentações e *workshops*. O objetivo inicial de fazer com que o veículo levitasse ao menos um minuto foi amplamente ultrapassado e permitiu uma margem de segurança muito maior no experimento. O projeto foi selecionado para uma das maiores feiras de ciência da Europa e foi uma das principais atrações. Por se tratar de um fenômeno pouco visto e conhecido, o trem de levitação quântica cativou a atenção de crianças e adultos de todas as áreas. O projeto foi considerado um grande sucesso para o Centro de Ciência, o qual foi replicado para a companhia ferroviária luxemburguesa, CFL, que o mantém em sua sede principal. Além disso, ele é apresentado de forma frequente, atingindo um público de aproximadamente 80 mil pessoas. Este trabalho serve de guia prático para a reprodução de um sistema similar junto aos cursos de engenharia que se interessarem pelo assunto.

## REFERÊNCIAS

- CHIBA, A. et. al. Removal of arsenic from geothermal water by high gradient magnetic separation. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, v. 12, n. 1, 952, 2002.
- COOMBS, T. A. et. al. Superconducting bearing in flywheels. **Science Engineering B** 53, 225, 1998.
- DIAS, D. H. et. al. Application of texture YBCO bulks with artificial holes for superconducting magnet bearing. **Superconductor Science and Technology**, v. 28, 075005, 2015.
- GRUSS, S. et. al. Superconducting bulk magnets: very high trapped fields and cracking. **Applied Physics Letters**, v. 79, n. 19, 3131, 2001.



- HAN, Y. H. et. al. Design and characteristics of a superconductor bearing. **IEEE Transactions Applied Physics**, v. 15, n. 2, 2249, 2005.
- HEBERT, S. et. al. Pinning enhancement in Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>8</sub> by tilting columnar defects from the c axis. **Physica C**, 299, 1998.
- HULL, J. R. Superconductor bearing. **Superconductor Science and Technology**, 13, R1, 2000.
- KIM, C-J. et. al. CeO<sub>2</sub> as a growth inhibitor of Y<sub>2</sub>BaCuO<sub>5</sub> in a Ba<sub>3</sub>Cu<sub>5</sub>O<sub>x</sub> liquid phase. **Mater Letters**, v. 34, 392, 1998.
- KIM, C-J., et. al. The effect of BaCeO<sub>3</sub> nano particles on the current density of a melt-processed YBCO superconductor. **Physica C**, 344, 2007.
- KIM, K-M. Simple die pressing for making artificial holes in single-grain Gd<sub>1.5</sub>Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-y</sub> superconductors. **Superconductor Science and Technology**, 25, 105016, 2012.
- MEISSNER, W.; OCHSENFELD, R. Ein neuer Effekt bei Eintritt der Supraleitfähigkeit. **Naturwissenschaften**, 21(44), 787, 1993.
- MORITA, M.; TESHIMA, H.; HIRANO, H. Development of oxide superconductor - high-T<sub>c</sub> bulk superconductor, QMG, and its magnetic application. **Nippon Steel Technical Reports**, 93, 18, 2006.
- MURAKAMI, M. et. al. Critical currents and flux creep in melt processed high T<sub>c</sub> oxide superconductors. **Cryogenics**, 30, 390, 1990.
- NOUGEM J. G. et. al. Melt textured YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> bulk with artificially patterned holes: a new way of processing c-axis fault current limiter meanders. **Superconductor Science and Technology**, 17, 931, 2004.
- OGUN, S. E. et. al., Effect of low-energy electron irradiation on (Bi,Pb)-2212 superconductor. **Surface and Coatings Technology**, 196, 118, 2005.
- OKA, T. et. al. Application of HTS bulk magnet system to the magnetic separation techniques for water purification. **Physica C**, 468, 2128, 2008.
- ONNES H. K. Further experiments with liquid helium: the resistance of pure mercury at helium temperatures. **Communications from the Physical Laboratory of the University of Leiden**, 120b:124c, 1911.
- REN, Y. et. al., Damage caused by magnetic pressure at high trapped field in quasi-permanent magnets composed of melt-textured Y-Ba-Cu-O superconductor. **Physica C**, 251, 15, 1995.
- RIBEIRO, P. F. Energy storage systems for advanced power applications. **Proceedings of the IEEE**, 89(12), 1744, 2001.
- SHIGENATSU, K. et. al., (1989) Magnetic shield of high-T<sub>c</sub> oxide superconductors at 77 K. **Japanese Journal of Applied Physics**, 28(5), L813, 1989.
- SHLYK, L. et. al., Pinning behavior and magnetic relaxation in melt-processed YBCO doped with Li, Ni and Pd. **Physica C**, 377, 2002.



- SHLYK, L. et. al. Effects of annealing treatments on the superconducting melt-processed YBCO doped with Ni. **Superconductor Science and Technology**, 18, S10, 2005.
- TOMITA, M.; MURAKAMI, M., High-temperature superconductor bulk magnets that can trap magnetic fields of over 17 tesla at 29 K. **Nature**, 421:517, 2003.
- VASILIU, F. et. al., The role of irradiation damage structure and fine scale precipitation in the pinning improvement of thermal neutron irradiated lithium fluoride-doped YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub>. **Physica C**, 303, 209, 1998.
- YOKOYAMA, K., et. al., High gradient magnetic separation using superconducting bulk magnets. **Physica C**, 392, 739, 2003.
- ZHAO, Y.; CHENG, C. H.; WANG, J. S. Flux pinning by NiO-induced nano-pinning centres in melt-textured YBCO superconductor., 18, S43, 2005.
- ZHOU, Y. X.; SCRUGGS, S.; SALAMA K. Effects of ionic doping on superconducting properties of melt textured YBa<sub>2</sub>(Cu<sub>1-x</sub>M<sub>x</sub>)<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> (M=Co, Ni, Zn or Ga) large grains. **Superconductor Science and Technology**, 19, S556, 2006.